بررسی خطای گسستگی تپ‌چنجر در ترانسفورماتورهای توزیع

وحید زارعی، وحید بهجت، محمود اصغری‌آذر و هادی رسولی‌نژاد
شرکت توزیع نیروی برق تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، شرکت توزیع نیروی برق تبریز و شرکت توزیع نیروی برق تبریز

چکیده — سیستم‌های انرژی الکتریکی از مرحله تولید تا مصرف جهت عملکرد مطلوب تجهیزات شبکه و مصرف‌کنندگان بایستی پارامترهای کیفیت توان را در محدوده مورد قبول نگه دارند. یکی از این پارامترها ولتاژ می‌باشد. جهت تامین ولتاژ مورد تایید بایستی اندازه و فاز آن تحت کنترل باشد. یکی از روش‌های اصلی جهت تغییر ولتاژ استفاده از کلید تنظیم ولتاژ یا تپ‌چنجر می‌باشد. این کلید با تغییر تعداد دور میزان ولتاژ خروجی ترانسفورماتور را افزایش یا کاهش می‌دهد. یکی از خطاهای رخ داده در ترانسفورماتورهای توزیع عدم عملکرد صحیح کلید تنظیم ولتاژ می‌باشد. در یکی از موارد عملی خطاهای تپ‌چنجر، کلید تنظیم ولتاژ بعلت عدم جایگیری صحیح در محل اتصال به مرور زمان بر اثر برخی عوامل ذوب شده و گسستگی ایجاد شده است. گسستگی تپ-چنجر باعث عدم عملکرد متقارن این تجهیز شده و ولتاژ در سه فاز بصورت همزمان تغییر نمی‌کند. عملکرد نامتعادل کلید تنظیم ولتاژ در اثر گسستگی تپ‌چنجر باعث بروز مشکلاتی از جمله جریان گردشی، تلفات و ولتاژ نامتعادل در خروجی می‌شود. در این مقاله پس از بررسی خطای فوق و عوامل ایجاد خطا، میزان جریان گردشی و تلفات خطای گسستگی مورد بحث قرار گرفته و در نهایت روش‌های جلوگیری از موارد مشابه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی — کلید تنظیم ولتاژ (تپ‌چنجر)؛ خطای گسستگی؛ ترانسفورماتور توزیع؛ جریان گردشی

۱. مقدمه

امروزه در بهره‌برداری از شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی برخورداری از ولتاژ ثابت و در محدوده مشخص شده در قرار داد ما بین فروشنده (شرکت‌های توزیع) و خریدار (مصرف‌کننده) دارای اهمیتی خاص بوده و یکی از پارامترهای اساسی کیفیت توان تحویلی می‌باشد، چرا که تجهیزاتی که با انرژی الکتریکی کار می‌کنند برای ولتاژی خاص طراحی و ساخته شده‌اند. تغییرات ولتاژ در خارج از محدوده استاندارد باعث افت کیفیت توان شده و مشکلات عدیده‌ای را برای شبکه انرژی و مصرف کننده بوجود می‌آورد. در این میان مصرف کنندگان تکفاز با دارا بودن تجهیزات الکترونیکی و موتورهای تکفاز و مصرف کنندگان صنعتی با دارا بودن انواع موتورهای الکتریکی بخصوص موتورهای القایی با رتور قفس سنجابی تاثیر بیشتری را از پارامترهای کیفیت توان و از جمله اندازه و زاویه ولتاژ تحویلی می‌پذیرند.

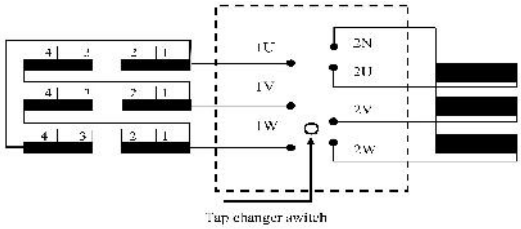
کنترل ولتاژ در صنعت برق از مرحله تولید تا توزیع همواره یکی از اساسی‌ترین چالشهای شبکه برق می‌باشد و بر این اساس تولید کننده و مصرف کننده با این موضوع نقاط مشترکی را دارا هستند. یکی از راههای کنترل ولتاژ در شبکه استفاده از ترانسفورماتور با قابلیت تغییر ولتاژ می‌باشد. بدین صورت که با افزایش و کاهش تعداد دور سیم‌پیچ، ولتاژ خروجی تحت کنترل قرار می‌گیرد. تغییر تعداد دور در ترانسفورماتور توسط تپ-چنجر صورت می‌گیرد. کلید تنظیم ولتاژ در ترانسفورماتورهای انتقال و توزیع وجود داشته ولی نحوه عملکرد آنها متفاوت می‌باشد هرچند هر دو هدفی یکسان را دنبال می‌کنند. تپ‌چنجرهای موجود در ترانسفورماتورهای انتقال قابلیت عملکرد در زیر بار داشته ولی ترانسفورماتورهای موجود در سیستم توزیع انرژی الکتریکی فاقد چنین قابلیتی بوده و جهت تغییر تپ بایستی ترانسفورماتور بی‌برق باشد. ترانسفورماتورهای دارای تپ‌چنجر نقش بسیار مهمی را در کنترل ولتاژ و پایداری شبکه‌های الکتریکی ایفا می‌کنند که کاربرد گسترده آنها در بخش‌های مختلف شبکه‌های انتقال و شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی مؤید این مطلب می‌باشد[۲و۱].

با توجه به اهمیت تأمین ولتاژ مورد نیاز مصرف‌کنندگان در سیستم‌های توزیع و حفظ آن در محدوده‌های مجاز، یکی از روش‌ها استفاده از ترانسفورماتورهای با قابلیت تغییر ولتاژ می باشد. اگر عملکرد تپ‌چنجر مختل شود، عملکرد ترانسفورماتور و مصرف کننده متاثر از این موضوع

خواهد شد. در این مقاله نخست درباره ساختار کلید تنظیم ولتاژ ترانسفورماتورهای توزیع توضیحاتی داده شده و سپس عیب رخ داده در یکی از موارد عملی تشریح می‌شود. در ادامه عملکرد ترانسفورماتور تحت خطای رخ داده مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و در انتها به راهکارهای تشخیص و جلوگیری از خطای فوق اشاره می‌شود.

۲. کلید تنظیم ولتاژ در ترانسفورماتورهای توزیع

تنظیم ولتاژ درصنعت برق می‌تواند در مراحل سه‌گانه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی صورت پذیرد. تغییرات ولتاژ در ساعات مختلف شبانه روز متفاوت بوده و تغییرات تپ بر اساس آن صورت می‌گیرد. این کنترل با تغییرات تعداد دور سیم‌پیچ و به تبع آن تغییر نسبت تبدیل انجام می‌شود. برای اینکار از کلید تنظیم ولتاژ استفاده می‌شود. این کلیدها از نظر انجام عمل تغییر ولتاژ به دو دسته قابل قطع و وصل زیر بار و غیر قابل قطع و وصل زیر بار تقسیم‌بندی می‌شوند. تپ‌چنجرهای مورد استفاده در ترانسفورماتورهای نیروگاهی، خطوط انتقال و پست‌های فوق توزیع از نوع اول می‌باشند. در ترانسفورماتورهای توزیع از نوع غیر قابل و قطع وصل زیر بار می‌باشند. این کلیدها بطور معمول در دو نوع سه و پنج حالته موجود بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای کنترل ولتاژ از سیم‌پیچ HV انشعاباتی از تعداد دور بخصوصی خارج شده و به تپ‌چنجر متصل می‌شود و تپ‌چنجر با اتصال کوتاه بخشی از سیم‌پیچ یا در مدار قرار دادن کل سیم-پیچ عمل تنظیم را انجام می‌دهد. برای انجام عمل تنظیم همانطور که اشاره شد در ترانسفورماتورهای توزیع باید ترانسفورماتور بی‌برق باشد. در ترانسفورماتورهای توزیع با قدرت بالای 200kva اتصال طرف اولیه بصورت مثلث بوده و طرف ثانویه دارای اتصال ستاره می‌باشد. سرهای ورودی به تپ‌چنجر از اتصال مثلث گرفته می‌شود. در «شکل ۱» نمایی از نحوه اتصالات سیم‌پیچ‌ها در ترانسفورماتورهای توزیع مشاهده می‌شود[۳].



شکل ۱ : نحوه اتصالات سیم‌پیچ و خروجی‌های تپ‌چنجر در گروه (Dyn5)

جهت افزایش و یا کاهش ولتاژ، کلید تنظیم ولتاژ با اتصال دو نقطه از نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ استفاده می‌کند. برای بیشترین افزایش ولتاژ از اتصال ۱ و ۴ و بیشترین کاهش ولتاژ ۲ و ۳ را بهم متصل می‌کند.

۳.بررسی خطای گسستگی تپ‌چنجر

۳,۱. مشخصات ترانسفورماتور و بررسی اولیه

پس از بررسی یک دستگاه ترانسفورماتور با مشخصات موجود در «جدول ۱» ملاحظه می‌گردد که ولتاژ خروجی ترانسفورماتور در حالت بی-باری نامتعادل بوده و همچنین جریان بی‌باری ترانسفورماتور فوق نیز از حد مجاز فراتر می‌باشد. جهت بررسی‌های بیشتر ترانسفورماتور به مرکز تعمیراتی منتقل و پس از تخلیه روغن نسبت به بازگشایی ترانسفورماتور اقدام می‌گردد. در این مرحله ملاحظه می‌شود که تپ‌چنجر دو فاز سیم‌پیچی از فاز دیگر جدا شده است که در «شکل ۲ و ۳» قابل ملاحظه است.

جدول ۱. مشخصات ترانسفورماتور دارای خطای گسستگی تپ‌چنجر

Power	500 kva
Frequency	50 Hz
Year	1361
Manufactory	IRAN - GERMANY
Vector Group	Dyn5
HV - Current	14.43 A
LV - Current	722 A
HV/LV Voltage	20/0.4 kv

شکل ۲ : گسستگی تپ‌چنجر ترانسفورماتور 500kva

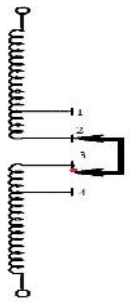
شکل ۳ : نمای نزدیک از خطای گسستگی تپ‌چنجر

۳,۲. *فرایند بروز خطای گسستگی تپ‌چنجر*

با افزایش یا کاهش ولتاژ مصرف‌کنندگان از حد مجاز، شرکت‌های توزیع در برخی موارد جهت حل مشکل فوق از تغییر تپ استفاده می‌کنند. در این میان اگر برخی افراد دارای عدم تخصص کافی نسبت به این کار اقدام نمایند احتمال آن می‌رود که تپ‌چنجر بدرستی در محل پیش‌بینی شده خود قرار نگیرد، یعنی کمی فاصله هوایی در نقاط اتصال باقی بماند («شکل ۴» نقطه ۳). در این شکل که برای یک فاز تپ‌چنجر آورده شده است، کلید با کنتاکت شماره ۲ اتصال صحیح داشته ولی با کنتاکت شماره ۳ اتصال کافی نداشته و فاصله‌ای کوچک موجود است. لازم بذکر است در نمایش فاصله هوایی جهت تحلیل بهتر اغراق صورت گرفته است.

پس از تعویض تپ، ترانسفورماتور تحت بار قرار می‌گیرد و با توجه به وجود اختلاف پتانسیل بالا، لجن موجود در روغن که ناشی از عمر بالا و بارگیری متمادی ناشی شده است و عدم اتصال کامل در سرهای کلید تنظیم ولتاژ شروع به تخلیه الکتریکی در آن محل می‌شود. با افزایش دما و بار این فرایند تا جایی پیش می‌رود که تپ‌چنجر از محل اشاره شده در «شکل ۳» گسسته می‌شود.

با گذر از فصل تابستان و کاهش بار از سوی مصرف‌کنندگان جهت کاهش ولتاژ درخواست می‌گردد وتپ ترانسفورماتور به تپ نرمال باز می‌گردد ولی در این حالت دو فاز ترانسفورماتور در یک تپ و یک فاز ترانسفورماتور در تپ دیگری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. علت بروز این حالت اینست که مکانیزم کلید تنظیم ولتاژ در دو فاز عمل می‌کند ولی در فاز سوم بعلت گسسته شدن کلید در حالت اولیه خود باقی می‌ماند.



شکل ۴: آرایش اتصال کلید تنظیم ولتاژ در یک فاز

۴.عملکرد ترانسفورماتور تحت خطای گسستگی تپ‌چنجر

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، خطای گسستگی تپ‌چنجر در صورتی رخ می‌دهد که فازهای مختلف ترانسفورماتور که همگی باید در یک پله همنام عمل کنند بعلت عدم جایگیری مناسب در گذر زمان از هم جدا شده و در پله‌های ناهمنام تحت پتانسیل قرار می‌گیرند.

در حالت عملکرد نرمال با توجه به «شکل ۵» روابط زیر بر مسئله حاکم است:

$$V_{U=20000\angle 0} \ , V_{V=20000\angle -120} \ , V_{W=20000\angle +120} \qquad (۱)$$

$$R_U = R_V = R_W \qquad (۲)$$

$$jX_U = jX_V = jX_W \qquad (۳)$$

که در روابط فوق:

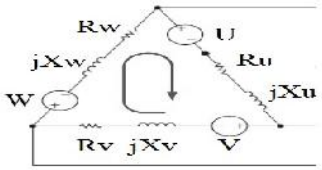
V_U، V_V و V_W به ترتیب نشان دهنده ولتاژ سمت فشار قوی برای فازهای U، V و W

R_U، R_V و R_W به ترتیب نشان دهنده مقاومت اهمی سمت فشار قوی برای فازهای U، V و W

X_U، X_V و X_W به ترتیب نشان دهنده راکتانس سلفی سمت فشار قوی برای فازهای U، V و W

با توجه به رابطه (۴)، اندازه ولتاژ القایی در هر سه سیم‌پیچ با هم برابر بوده و دارای اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای می‌باشند و از طرفی میزان مقاومت اهمی و راکتانس القایی فازها نیز باهم برابر می‌باشد. در نتیجه جریان گردشی ناشی از این موضوع صفر خواهد بود[۴و۵].

$$I_{Circ=}\frac{V_{U(20000\angle 0)}+V_{V(20000\angle -120)}+V_{W(20000\angle +120)}}{Z_t(R,jX)} \qquad (٤)$$



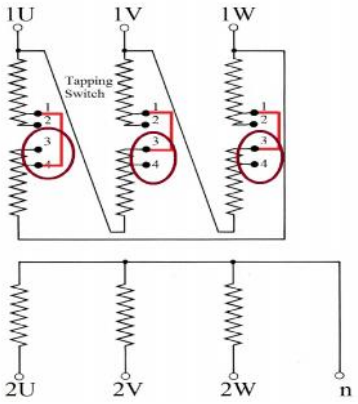
شکل ۵ : مدار معادل سیم‌پیچ با اتصال مثلث، نیرو محرکه و امپدانس هر فاز

با توجه به «شکل ۶» زمانیکه عملکرد تپ‌چنجر مختل شده و مکانیزم عملکرد توانایی تغییر تپ در سه فاز را نداشته باشد، میزان ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌ها متفاوت از یکدیگر می‌شود. در این حالت جریان گردشی صفر نشده و میزان آن وابسته به اختلاف ولتاژ ناشی از اختلاف پله‌ها خواهد بود، چرا که ارتباط مکانیزم با یکی از فازها قطع شده است.

با توجه به رابطه (۴)، در حالت عدم تعادل جمع برداری ولتاژها صفر نشده و یک عدد را به خود اختیار می‌کند و در نتیجه شاهد حضور جریان گردشی خواهیم بود.

حالت مداری این حالت که در «شکل ۷» نشان داده شده است، باعث بروز دو مشکل اساسی و برخی مشکلات ثانویه می‌شود. با توجه به کارکرد ترانسفورماتور در موقعیت‌های مختلف تپ برای سیستم سه فازه ولتاژی نامتعادل در خروجی مشاهده می‌گردد. ولتاژ نامتعادل برای مصرف-کنندگان تکفاز، برای فازی که ولتاژ آن ثابت بوده برخی مشکلات را بوجود می‌آورد.

شکل ۶ : اتصال مکانیکی مکانیزم عملکرد تپ‌چنجر با دو فاز



شکل ۷ : اتصال نامتعادل تپ‌چنجر در سه فاز

در این میان مصرف‌کنندگان صنعتی که عمده بار آنها موتور القایی می‌باشند شاهد اختلال در عملکرد موتورهای القایی خواهد بود. از این مشکلات می-توان به افزایش تلفات، ریپل گشتاور، تغییر سرعت، افزایش هارمونیک و ... اشاره نمود. در خود ترانسفورماتور نیز با توجه به اتصال مثلث و عملکرد در تپ‌های مختلف، جریان گردشی بوجود می‌آید. مقدار این جریان گردشی تابعی از دو پارامتر خواهد بود:

۱- میزان اختلاف ولتاژ ما بین تپ‌های مختلف

۲- امپدانس هر فاز سیم‌پیچی

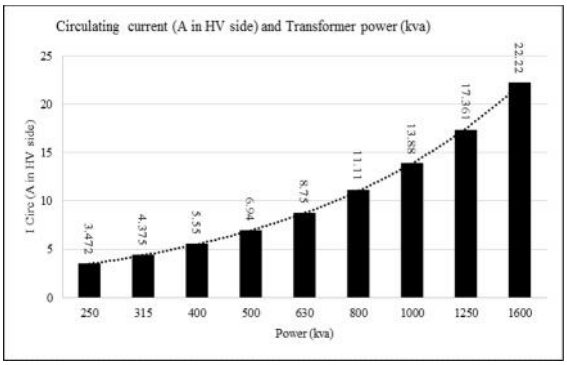
جهت محاسبه جریان گردشی که تنها ناشی از اختلاف پتانسیل در اثر موقعیت مختلف تپ بوجود آمده است، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$I_{Circ=}\frac{V_{U(2000\angle 0^{\circ})}+V_{V(2000\angle -120^{\circ})}+V_{W(2000\angle +120^{\circ})}+V_{Tap\ difference}}{Z_t(R,jX)} \quad (۵)$$

این جریان گردشی علاوه بر ترانسفورماتور فوق که دارای مشخصات «جدول ۱» می‌باشد برای کلیه ترانسفورماتورهای دارای اتصال مثلث در اولیه خود که شامل قدرت ۲۵۰ kva تا ۱۶۰۰ kva می‌شود، می‌تواند بصورت محاسباتی یا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بدست آید که اینکار انجام و نتایج آن در «جدول ۲» آورده شده است. البته جهت محاسبات برخی ساده سازی‌ها انجام شده است. جریان محاسبه شده برای حالتی انجام یافته که اختلاف موجود در تپ ترانسفورماتور یک پله بوده که البته قابل تعمیم به اختلاف دو پله‌ای نیز می‌باشد و همچنین میزان اختلاف ولتاژ ۱۰۰۰ ولت در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است که در برخی موارد اختلاف ولتاژ پله‌های تپ ۸۰۰ یا ۵۰۰ ولت (با توجه به کارخانه سازنده) می‌باشد ولی با توجه به اینکه مورد پیش آمده دارای پله‌های تپ ۱۰۰۰ ولتی بوده است، جهت بررسی از ولتاژ ۱۰۰۰ استفاده گردیده است. با بررسی میزان جریان گردشی و ترسیم نمودار آن در «شکل۸» ملاحظه می‌گردد که جریان گردشی بوجود قابل ملاحظه بوده و با قدرت ترانسفورماتور متناسب است. این تناسب از آنجا ناشی می‌شود که میزان امپدانس هر فاز از سیم‌پیچ اتصال مثلث با تغییر قدرت ترانس، مقدار دیگری اختیار می‌کند و اندازه جریان گردشی تغییر می‌کند.

جدول ۲ : جریان چرخشی به ازای قدرت‌های مختلف در اثر خطای گسستگی

Power (kva)	I circ (A in HV side)
250	3.472
315	4.375
400	5.55
500	6.94
630	8.75
800	11.11
1000	13.88
1250	17.361
1600	22.22

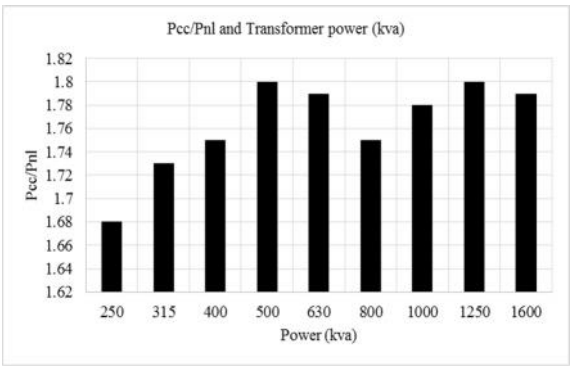


شکل ۸ : نمودار جریان گردشی در قدرت‌های مختلف در اثر خطای تپ‌چنجر

از طرفی نیز این جریان گردشی باعث افزایش تلفات بی‌باری ترانسفورماتور شده و همچنین افزایش دما و جریان بی‌باری را برای ترانسفورماتور بوجود می‌آورد. میزان تلفات اهمی ناشی از عملکرد ترانسفورماتور در موقعیت اختلاف یک پله‌ای در «جدول ۳» آمده است. جهت تسهیل مقایسه، میزان این تلفات با تلفات بی‌باری ترانسفورماتور مقایسه شده و با عددی که نسبت تلفات ناشی از جریان گردشی به تلفات بی‌باری است، برای قدرت‌های مختلف در «شکل ۹» قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این میزان بسیار بیشتر بوده و به عبارت دیگر در برخی موارد باعث دو برابر شده تلفات بی‌باری می‌شود. البته جریان بی‌باری کشیده شده از سمت اولیه نیز دستخوش تغییرات خواهد گشت ولی با توجه به عدم تعادل مقادیر آنها متفاوت خواهد بود. جریان‌های کشیده شده از سمت ثانویه با توجه به اتصال ستاره وابسته به بار خواهد بود ولی در بارهای سه‌فازه، عدم تعادل در ولتاژهای خروجی باعث عبور جریان از نقطه صفر اتصال ستاره خواهد شد.

جدول ۳ : تلفات جریان گردشی به ازای قدرت‌های مختلف ترانسفورماتور

Power (kva)	P-cc (W)
250	1030
315	1250
400	1493
500	1805
630	2152
800	2546
1000	3125
1250	3796
1600	4583



شکل ۹ : نسبت تلفات جریان گردشی به تلفات بی‌باری به ازای قدرت‌های مختلف ترانسفورماتور

۵.ارائه راهکار

با توجه به اینکه خطای گسستگی تپ‌چنجر باعث بوجود آمدن جریان گردشی در حالت بی‌باری و افزایش تلفات مسی ترانسفورماتور می‌شود و از طرفی نیز به مرور زمان موجب افزایش حرارت و به تبع آن کاهش عمر عایق سلولزی را موجب می‌شود، جلوگیری از خطای فوق باعث افزایش راندمان و عمر ترانسفورماتور و تامین انرژی با کیفیت مصرف‌کنندگان را موجب می‌شود. فلذا با توجه به تجارب عملی راهکارهای زیر می‌تواند در حل مشکل موثر واقع شود.

۱. تغییر تپ در هنگام انجام تعمیرات پیشگیرانه جهت جلوگیری از رسوب لجن و ایجاد کنتاکت رسیستانس[۳].

۲. تغییر موقعیت تپ از ۱ به ۳ (در ترانسفورماتورهای دارای سه تپ) و برعکس، جهت درگیر نمودن تمامی پله‌ها در هنگام تغییر تپ جهت جلوگیری از بروز موارد بند یک

۳. اندازه‌گیری ولتاژ قبل و بعد از تغییر تپ

۴. اندازه‌گیری میزان مقاومت اهمی سیم‌پیچ اولیه در صورت برخورد با موارد مشابه

۵. کنترل میزان سطح روغن ترانسفورماتور به جهت اینکه در برخی موارد، سطح روغن از سطح تپ‌چنجر نیز پایین آمده و باعث عدم غوطه‌وری کلید تنظیم ولتاژ در روغن می‌شود و این امر کاهش مقاومت عایقی بین اتصالات تپ‌چنجر را باعث می‌شود.

۶.نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به لزوم تغییر ولتاژ و نگهداری آن در محدوده مجاز اشاره شد و سپس به عملکرد تپ‌پنجر در ترانسفورماتورهای توزیع پرداخته شد. در ادامه خطای گسستگی تپ‌چنجر که بصورت عملی نیز رخ داده بود، مورد بررسی قرار گرفت. این خطا باعث بوجود آمدن جریان گردشی، تلفات و کاهش عمر عایقی می‌شود، فلذا باید از بروز چنین خطاهایی جلوگیری شود. راهکارهای جلوگیری و تشخیص خطای فوق نیز مورد بررسی قرار گرفت. میزان تلفات بوجود آمده ناشی از این خطا بیشتر از تلفات بی‌باری ترانسفورماتور می‌باشد و چون تلفات گسستگی تپ‌چنجر مانند تلفات بی‌باری در تمامی لحظات برق‌داری ترانسفورماتور (بی‌باری و بارداری) وجود دارد، باعث افزایش تلفات بهره‌بردار می‌شود.

منابع

[۱] علی اصغر امجدی و سعید کدخدا، " مطالعه و بررسی امکان حذف تپ‌چنجر در ترانسفورماتورهای توزیع" ، پنجمین کنفرانس شبکه-های توزیع نیروی برق، خراسان، ایران، خرداد ۱۳۷۴

[۲] سید محمد نوربخش رضایی و علی اکبر افضلیان، " کنترل هماهنگ ترانسفورماتور مجهز به تپ‌چنجر و جبرانگر استاتیکی توان راکتیو با استفاده از نظریه‌ی کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته پیشامد " ، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، توانیر، تهران، ایران، ۱۳۸۶

[۳] راهنمای خرید، نصب، بهره،برداری و خدمات پس از فروش ترانسفورماتورهای توزیع روغنی هرمتیک و کنسرواتوری، ایران ترانسفو

[4] D. A. Koppikar , S. V. Kulkarni ; G. Ghosh ; S. M. Ainapure and J. s. Bhavsar, “Circulating-current loss in transformer windings,” IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology , vol. 145, pp. 136-140, Jul 1998.

[5] T. Zheng and Q. Liu “A novel algorithm of calculating the circulating current on the delta side of three phase wye-delta connected transformer,” Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, pp. 1-4, 26-30 Oct. 2009